GENERACIÓN DE PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO, BIOCHAR Y CARBÓN ACTIVADO, A PARTIR DE RESIDUOS DOMICILIARIOS DE BIOSEGURIDAD Y RESIDUOS DE PODA MUNICIPAL

Instituto de Investigaciones Químicas, UMSA:
Luis G. Lopez N.
Sulema N. Valdez C.
Saul Cabrera M. (+)
Giancarla Martinez.
Rodrigo Surculento.
Ronald M. Lara P.

Instituto de Genética, UMSA:
Gina Torres A.
Noemi Tirado B.
Jessika Barron

Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos, UMSA:
Jorge A. Velasco C.

Empresa Municipal de Áreas Verdes, Parques y Forestación, EMAVERDE:
Sergio Zambrana G.

RESUMEN
Se ha implementado un proceso pirolítico adecuado para la transformación de residuos de bioseguridad y residuos de poda municipal en BIOCHAR y CARBÓN ACTIVADO.

Respecto al proceso pirolìtico se estudiaron los efectos que tienen las diferentes variables del proceso en el biochar final. Las condiciones de trabajo óptimas fueron 472°C como temperatura de pirólisis, una proporción de 50:50 entre barbijos de bioseguridad y residuos de poda municipal. Y un tiempo de pirólisis de 90 minutos, el gas inerte aplicado para el proceso fue nitrógeno a un flujo de 1 L/min.

Por otro lado, se dosificó biochar para visualizar su efecto a aplicarlo como sustrato en dos especies de plantas de porte bajo; Lechuguines y Ajuga Rosada y una especie floral en este caso Gazania. Los resultados indican que el Biochar puede ser utilizado como sustituto de la Turba, siendo así una alternativa promisoria, renovable y amigable para el medio ambiente.

Además, se obtuvieron distintas muestras de carbón activado con diferentes características en base al biochar obtenido, la activación aplicada fue una activación salina con cloruro de amonio y diferentes tratamientos térmicos. Finalmente estos carbones fueron probados como materiales adsorbentes de contaminantes. En este sentido fueron utilizados para remover Arsénico (V) de soluciones sintéticas y también como filtro para la adsorción de monóxido de carbono.

Palabras clave: COVID-19, residuos de bioseguridad, pirólisis, biochar, carbón activado, plantines municipales, arsénico, monóxido de carbono.

1. INTRODUCCIÓN
Debido a la situación actual ocasionada por la pandemia del COVID-19 es que se generan diariamente elevadas cantidades de residuos de bioseguridad, principalmente barbijos (Jung et al., 2021), los cuales no tienen un destino final claro y tampoco pueden ser reutilizados, ocasionando problemas ambientales y de salud pública.

Existen muchos tratamientos para la disposición final de los residuos de bioseguridad, siendo la pirólisis una de las técnicas que presentan mayores beneficios ya que con esta se puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, además de que, debido a las altas temperaturas de operación, se puede asegurar la eliminación de los patógenos presentes en los residuos de bioseguridad y principalmente con este tratamiento se pueden generar productos de valor agregado como es el caso del biochar (utilizado como mejorador de suelos y como adsorbente de contaminantes en medio acuoso y gaseoso), el tar (utilizado como combustible) y el syngas (Wang J. et al., 2020).

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

La pirólisis es un proceso de descomposición química y térmica de un material, generalmente llevándolo a moléculas más pequeñas (Stauffer E. et al., 2008). Las propiedades físicas y químicas del biochar están influenciadas por las condiciones de operación, tales como el tiempo de residencia, la temperatura de pirólisis, el tipo de materia prima utilizado entre otros (Kloss S. et al., 2012) y dependiendo de estas propiedades se puede dar uso al biochar en diferentes aplicaciones.

En el presente documento se describe el proceso de obtención de biochar y carbón activado empleando como materia prima residuos de bioseguridad y residuos de poda municipal. Además de estudiar las aplicaciones del biochar como sustrato en la plantación de plantines municipales, como adsorbente de contaminantes acuosos como el Arsénico y como filtro de monóxido de carbono.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia prima

Los residuos de poda de jardinería municipal fueron proporcionados por la Empresa Municipal de Áreas Verdes Parques y Forestación (EMAVERDE) dependiente del Gobierno Autónomo Municipal de La Paz. Los barbijos (KN-95 y quirúrgicos) fueron recolectados en el mercado de la zona Achumani en la ciudad de La Paz, se escogió esta zona debido a una encuesta previamente elaborada. También se recolectaron barbijos de forma interna entre los investigadores del proyecto. Los trajes de bioseguridad y los guantes fueron adquiridos de manera comercial.

2.2. Proceso pirolítico

Para el proceso pirolítico se contó con un reactor tubular de cuarzo en el cual existe un flujo de inerte constante y es precalentado a 472°C, el material a tratar (mezcla barbijo:residuos de poda) es introducido al reactor mediante un pellet de vidrio en el cual se encapsula la mezcla, el material es mantenido a estas condiciones durante 1.5 horas y posteriormente se somete a un enfriamiento rápido extrayéndolo del tubo reactor.



Figura 1. Reactor pirolítico a escala Bench.

2.3. Obtención de carbón activado

El proceso de activación se realizó partiendo del biochar obtenido a las condiciones bench, este material fue tratado con cloruro de amonio (NH_4Cl) (Moussavi G. 2013), se utilizaron 80 gramos de Biochar mezclados con 2% de cloruro de amonio. A esta mezcla se añadieron 350 mL de agua destilada y se dejó en agitación constante durante 24 horas. El producto obtenido se llevó a evaporación durante 48 horas a 110°C, este material seco se trató térmicamente a 500, 700 y 800°C a 1 y 2 horas en atmósfera inerte de nitrógeno acorde a un diseño experimental, de esta experiencia se obtuvieron diferentes productos que fueron estudiados de manera aplicativa.

2.3. Técnicas de caracterización

2.3.1. Curvas de descomposición térmica - Análisis termogravimétrico (ATG)

El análisis termogravimétrico es una técnica que permite registrar la variación de la masa de un compuesto al someterla a un tratamiento térmico. Esto permite determinar condiciones de descomposición térmica, lo cual resulta de gran utilidad para la caracterización de la materia prima (barbijos, guantes, trajes de bioseguridad y residuos de poda municipal).

Para la determinación de las curvas de descomposición térmica de la materia prima, las muestras se sometieron a temperatura atmosférica, atmósfera inerte generada con un flujo de nitrógeno de 20 mL/min y una rampa de calentamiento de 10°C/min. El rango de temperatura estudiado fue de 25°C hasta 447°C y se mantuvo la temperatura final durante 30 minutos.

2.3.2. Determinación del área superficial - Fisisorción con nitrógeno

La técnica consta de la obtención de una fracción de la isoterma de adsorción en el rango BET de presiones parciales (0.05 - 0.30). Posteriormente se realiza un tratamiento matemático para linealizar los datos y así mediante regresión lineal conocer el área superficial del material estudiado.

Para esto la muestra fue degasificada en un portamuestras en forma de “U” durante 30 minutos en atmósfera inerte a 200°C. Posteriormente, la masa es registrada y se hace circular nitrógeno a distintas presiones parciales (mezcla nitrógeno:helio). Seguidamente, el portamuestras es sumergido en nitrógeno líquido para favorecer la condensación del nitrógeno. La cantidad de nitrógeno adsorbida es registrada con un detector de termoconductividad (TCD).

2.3.3. Capacidad de intercambio catiónico aparente

Se refiere a la capacidad de cationes que posee un material en su superficie. Este valor fue determinado mediante la aplicación de un electrodo selectivo de amonio y una solución 0.1M de nitrato de amonio. El biochar obtenido es mezclado con la solución de nitrato de amonio y se deja en agitación durante aproximadamente 1 hora. Los cambios en la concentración de amonio son registrados con el electrodo selectivo de iones amonio. Finalmente, los resultados son expresados como una relación entre la concentración de amonio adsorbida y la masa de biochar utilizada. El ión amonio es utilizado debido a que por su tamaño y distribución de cargas es el más selectivo y permite desplazar otros iones presentes en la superficie.

2.4 Aplicaciones

2.4.1 Aplicación de biochar en plantines municipales

Se analizaron tres especies de plantas: Ajuga Rosada (*Ajuga Rpetans*), Lechuguin (*Tanacethum parthenium*) y Gazania, todas proporcionadas por EMAVERDE y la plantación se realizó en el Vivero Municipal de la zona de Aranjuez.

Para las Ajugas Rosadas y los Lechuguines se estudió el efecto que tiene la dosis del biochar añadida al sustrato, conformado (en porcentaje másico) por 78% de tierra negra, 15% de turba y 7% de abono, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño experimental para las especies de plantines.

	Lechuguín, Ajuga Rosada	**Gazania**
Variable independiente	Dosis de biochar (en % volumétrico)	Dosis de biochar (en % másico)
Variables respuesta	Altura, diámetro de tallo, índice de robustez.	Altura, diámetro de tallo, índice de robustez
Niveles de dosificación	4 (0%, 2.5% , 5% y 7.5%)	2 (0% y 5%)
# Experimentos totales	24	10
# Réplicas	6 para el nivel de 2.5%	5 para el nivel de 5%

	6 para el nivel de 7.5% 3 para el nivel de 5% 9 para el nivel de 0% (testigos)	5 para el nivel de o% (testigos)
Nivel de confianza	95%	95%
Hipótesis nula	Existe diferencia entre tratamientos	Existe diferencia entre tratamientos
Hipótesis alterna	Al menos uno de los tratamientos es válido	Al menos uno de los tratamientos es válido
Orden de los experimentos	Aleatorio	Aleatorio

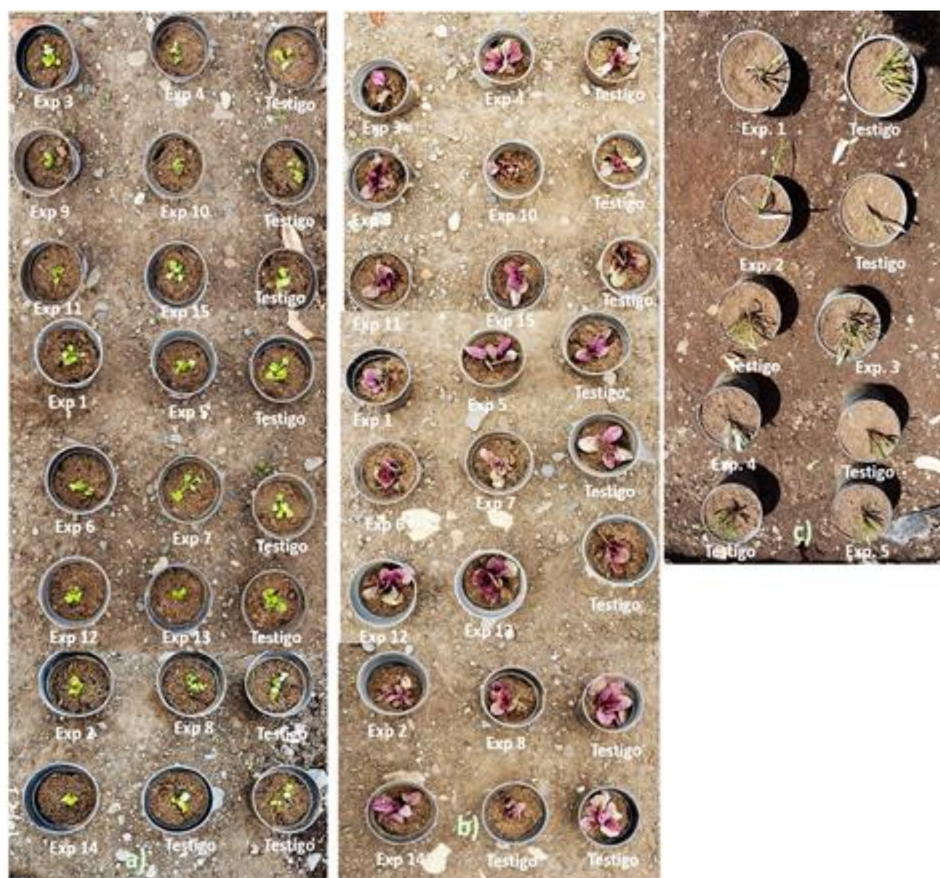


Figura 2. Distribución de plantines según diseño experimental: a) Lechuguines, b) Ajugas Rosadas y, c) Gazanias.

La plantación se realizó el 15 de enero del presente año, mediante esquejes, tapando los plantines con una malla de semisombra. Se realizó el seguimiento una vez al mes durante 5 meses mediante registro fotográfico además de medir la tasa de crecimiento y el diámetro del tallo mediante el uso de un vernier.

Como pruebas adicionales, se realizaron mediciones de retención de humedad y de índice de biomasa en Lechuguines dosificados con 5%, 10% y 50% de biochar como reemplazo de turba (BC5, BC10 y BC50 respectivamente).

Para la medición de humedad se emplearon sensores de humedad capacitivo “Capacitive soil moisture sensor 1.2 V” controlado por un microcontrolador Arduino realizando el tratamiento de datos en Matlab y Python. La medición del índice de biomasa se hizo de acuerdo a la metodología empleada por (Sáenz R. et al, 2010).

2.4.2. Aplicación de carbón activado para la adsorción de CO

El carbón activado fue probado como material adsorbente de CO, para esto se generó un lecho de carbón activado en un portamuestras en forma de “U”. Aproximadamente 0.20g de biochar fueron introducidos por prueba. A partir de este portamuestras se hizo circular nitrógeno como gas como transporte y para dar atmósfera inerte. Posteriormente, se inyectaron 0.3mL de CO con una jeringa cromatográfica. Este procedimiento se realizó 10 veces y se registraron las áreas de CO residual con un TCD.

La capacidad de adsorción de CO de los carbones activados probado se comparó con la capacidad de adsorción del biochar sin activar. Esto permitió conocer la capacidad de adsorción relativa de las muestras probadas, brindando un parámetro de comparación inter-muestras más adecuado.

2.4.3. Aplicación de carbón activado para la adsorción de arsénico

Para la aplicación del carbón activado como adsorbente de As^{V} se preparó una solución de arseniato de sodio (Na_2HAsO_4*$_7H_2O$) con una concentración de 150 ppm de arsénico (As^{V}). Se tomaron alícuotas de 100 mL a las cuales se añadieron 100 mg de Carbón Activado y aproximadamente 0.1g de NaNO3. La adsorción se llevó a cabo a pH = 6 y se dejó en agitación constante durante 3 horas a temperatura ambiente. Finalmente las muestras fueron filtradas y almacenadas a pH 2. La regulación del pH se realizó con ácido clorhídrico 1M.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la materia prima

Los residuos de bioseguridad originalmente planteados para ser tratados fueron: barbijos, guantes y trajes de bioseguridad, esto basado en los resultados de la encuesta (ver anexos). Los termogramas obtenidos pueden ser observados en la Figura 3.

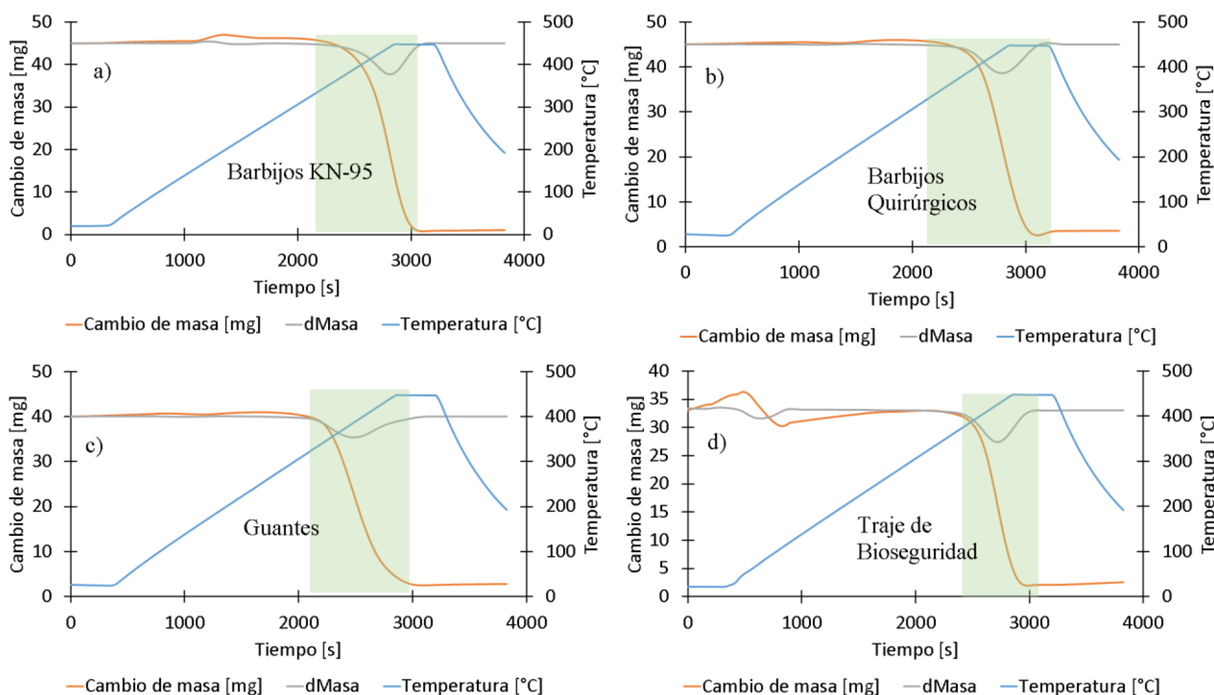


Figura 3. Termogramas de los residuos de bioseguridad estudiados: a) barbijos KN-95, b) barbijos quirúrgicos, c) Guantes y d) Traje de bioseguridad.

La Figura 3 permite observar que el comportamiento de descomposición térmica de los distintos residuos de bioseguridad estudiados es similar, los cuatro materiales se descomponen abruptamente por encima de cierta temperatura. Para los barbijos quirúrgicos y KN-95 el rango de descomposición se encuentra entre 360°C - 447°C, para los guantes en el rango de 340°C - 447°C y para los trajes de bioseguridad de 380°C - 447°C.

Por otro lado, es importante mencionar que el municipio de La Paz genera una cantidad considerable de residuos de jardinería en tiempos de poda: desde 1 ton/mes hasta 10 ton/mes. Y es bien sabido que estos residuos poseen cantidades significativas de lignina (Staley, 2012) lo cual puede favorecer los rendimientos y la calidad del Biochar. En este sentido, se realizaron pruebas de descomposición térmica de residuos de i) poda municipal y ii) una mezcla de barbijos con residuos de poda, como una alternativa para la generación de biochar. Los termogramas obtenidos pueden ser observados en la Figura 4.

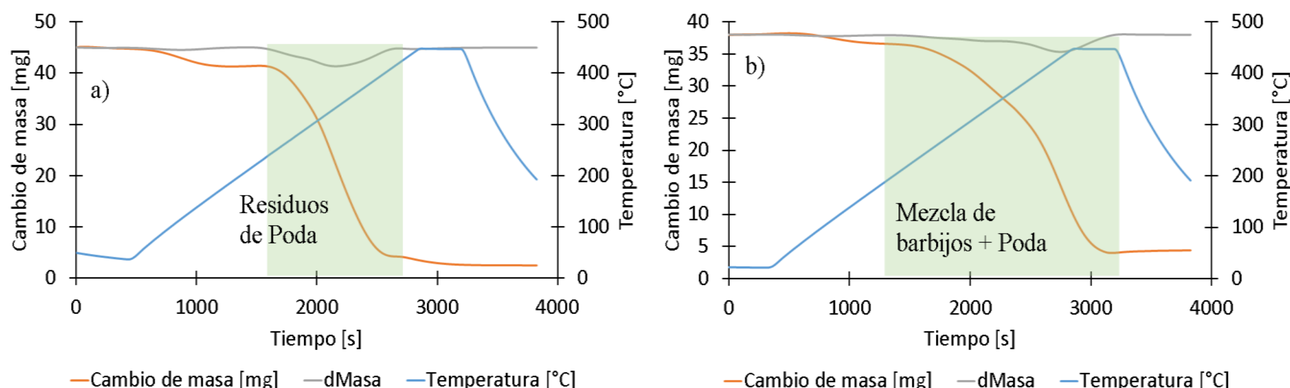


Figura.4. Termogramas de residuos estudiados para a) residuos de poda municipales y b) mezcla de barbijos con poda.

En la Figura 4 se puede observar que el comportamiento de descomposición de los residuos de poda municipal y la mezcla de barbijos y restos de poda. El rango de descomposición para los residuos de poda se encuentra entre 250°C - 447°C y para la mezcla de barbijos con resto de poda entre 240°C - 447°C.

3.2 Tratamiento de residuos de bioseguridad - Escalamiento

La obtención de biochar fue realizada en un reactor pirolítico tubular que opera con nitrógeno como gas inerte para el proceso con flujos que dependen del volumen del reactor, por medio del parámetro tiempo de residencia, como estado final este fue de 1 litro/ min, la temperatura del proceso fue fijada en 472°C, la composición de la materia prima (relación barbijo:residuo de poda municipal) fue de 50:50 y el tiempo de pirólisis fue de 1.5 horas.

Este proceso contó con diferentes escalas de producción (micro, mini, bench), donde la principal diferencia entre ellas fue el volumen del reactor y por tanto la cantidad de masa tratada, la escala micro contó con un volumen de 69.5 cm^3 y flujos de nitrógeno de 60 a 90 mL/min, los rendimientos de biochar fueron de 15 a 30% w/w de biochar con masas iniciales de 700 miligramos, el proceso a escala mini contó con un volumen de reactor de 269.82 cm^3 (3.9 veces mayor que la escala micro) y flujos de 100 mL/minuto, los rendimientos obtenidos en estas condiciones fueron de 14.3 a 35.7% w/w de biochar por aproximadamente 7 gramos de masa inicial siendo producidos entre 1 a 2.5 gramos por lote, el proceso escala bench cuenta con un volumen de 2.6 litros, el gas inerte en este caso fue argón y fluye a 1 L/min, los rendimientos obtenidos fueron estabilizados entre 19 a 25% w/w siendo la masa inicial 100 gramos de mezcla, las masas obtenidas de biochar oscilan alrededor de los 20 gramos.



Figura 5. a) Pellet a escala Bench, b) pellet a escala mini y c) pellet a escala micro.

3.3 Proceso pirolítico: Condiciones de operación

Para poder conocer y mejorar el proceso pirolítico es importante conocer cuál es el efecto que poseen las distintas condiciones de operación. Con este propósito en mente se consideraron el rendimiento de biochar y el área superficial de biochar como factores de respuesta. A continuación se detallarán las condiciones de operación estudiadas.

3.3.1. Efecto de la temperatura de pirólisis

Se evaluaron 4 temperaturas de pirólisis: 407°C, 427°C, 447°C y 467°C. Todos los demás parámetros de reacción se mantuvieron constantes (presión atmosférica, rampa de calentamiento de 10°C/min, flujo de inerte de 90 mL/min). Los parámetros de evaluación y comparación fueron el rendimiento de la pirólisis y el área superficial del Biochar. A continuación, la figura 6 muestra el comportamiento de la temperatura en función del rendimiento de biochar.

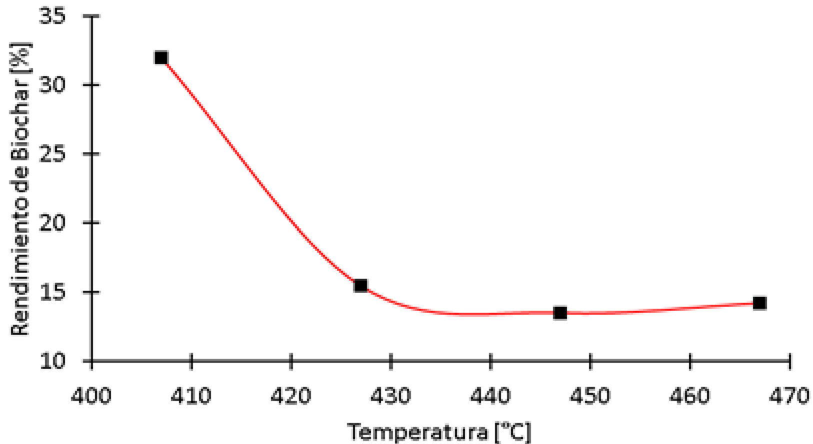


Figura 6. Efecto de la temperatura de la pirólisis en el rendimiento de Biochar.

Los valores de área superficial obtenidos a dichas temperaturas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Temperatura de pirólisis y área superficial específica de Biochar.

Temperatura [°C]	Área Superficial [m^2/g]
407	No cuantificable
427	4.1

447	16.5
467	16.8

3.3.2. Efecto de la rampa de calentamiento

Se evaluaron dos rampas de calentamiento (5 °C/min y 10°C/min), las otras condiciones de operación se mantuvieron constantes (temperatura de pirólisis 447 °C, tiempo de pirólisis 51 min). El parámetro de comparación fue el rendimiento del biochar. El comportamiento del rendimiento en función de la rampa de calentamiento se halla resumido en la Tabla 3.

Tabla 3. Rampa de calentamiento de pirólisis y rendimiento de Biochar.

Rampa de calentamiento, °C/min	Rendimiento de Biochar, %
5	22.1
10	18.6

3.4 Obtención de Carbón Activado

Se identificaron como respuestas, el rendimiento y el área superficial, para los diferentes carbones activados obtenidos, todos los resultados se encuentran en la tabla siguiente:

Tabla 4. Área superficial específica y rendimiento de carbón activado obtenidos a partir de un diseño experimental.

Temperatura, °C	Tiempo, horas	Rendimiento, %	Área Superficial Específica, m^2/g
500	1	81.7 - 89.2	27.3 - 57.2
500	2	89.1 - 90.1	132.4
700	1	78.5 - 82.1	212 – 292
700	2	76.9 - 82.4	164 – 303

3.3.3. Análisis elemental del biochar obtenido

Se caracterizó el biochar obtenido mediante el proceso pirolítico, el análisis elemental es comparado con muestras de biochar de bibliografía, como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 5. Resultados del análisis elemental del biochar obtenido mediante la pirólisis de residuos de barbijos de bioseguridad y residuos de poda de jardinería municipal (BC-BP).

Muestra	N, %	P, %	K, %	Ca, %	Fe, %	Mn, %	Zn, %
BCBP	1.9	0.21	0.96	3.85	0.25	0.04	0.02
Ref. *	0.6 – 1.6	0.1 – 2	0.4 – 2	1.8 – 5	0.1 – 0.5	0.02	0.02 – 0.04

* Referencia: (Walters *et al.*, 2015; Raboin *et al.*, 2016; Wijitkosum and Jiwnok, 2019; Pandey *et al.*, 2021)

3.3.4 Aplicación de biochar en plantines municipales

Mediante el registro fotográfico se pudo apreciar que los plantines tuvieron un desarrollo adecuado, contemplando algunas especies secas, las que en su mayoría se trataban de plantines testigo. El lechuguin es el que obtuvo un mejor desarrollo, debido a que presentaba una buena densidad de hojas, además de que se tuvo que realizar un trasplante a una maceta más grande al cabo de dos meses.

Con respecto a los resultados obtenidos de la tasa de crecimiento y diámetro de tallo se realizó un análisis de varianza ANOVA (one way). En todos los experimentos se encontró un "P - value" menor al nivel de significancia (alfa = 0.05), aceptándose la hipótesis nula. Los resultados de la retención de humedad se pueden apreciar en la Figura 7.

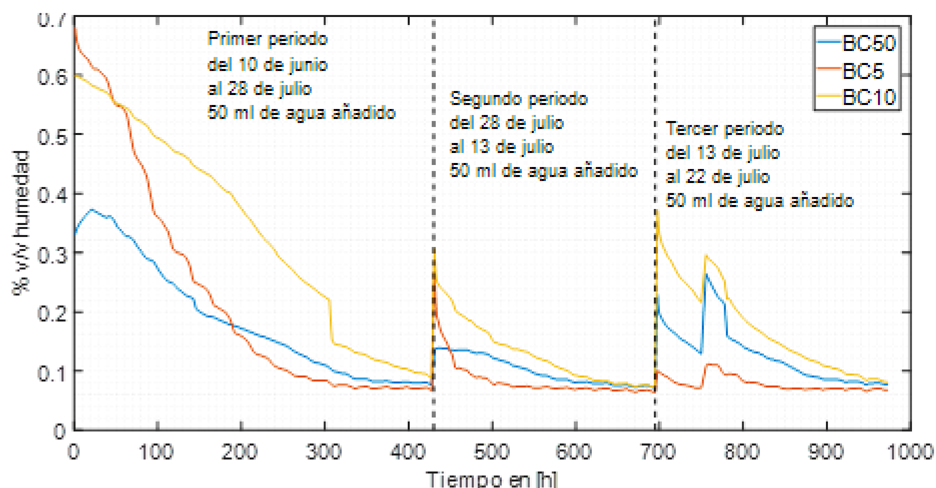


Figura 7. Perfil de retención de humedad en suelos con Biochar.

Con respecto al índice de biomasa, los resultados obtenidos son de 2.4, 2.2 y 2.4 para los plantines BC5, BC10 Y BC50 respectivamente.

3.6. Pruebas de adsorción de CO

En la Figura 8 se puede apreciar una comparación cualitativa de las capacidades de adsorción de CO en carbón activado y biochar. La capacidad de adsorción aparente del Biochar se considera igual a 1 como parámetro de comparación. Se puede notar que la capacidad de adsorción de CO mejoró en los 3 Carbones Activados respecto a la capacidad de adsorción del Biochar.

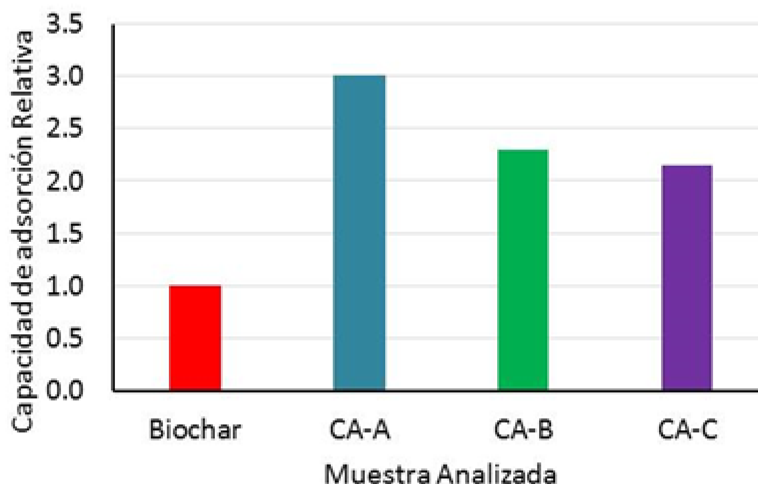


Figura 8. Capacidad de adsorción relativa de CO en Carbón Activado y Biochar.

3.7. Pruebas de adsorción de Arsénico

En la Figura 9 se puede observar de manera relativa la mejora que presenta la capacidad de adsorción de arsénico en las diferentes muestras, siendo el nivel de referencia la capacidad de adsorción de arsénico del Biochar sin tratar.

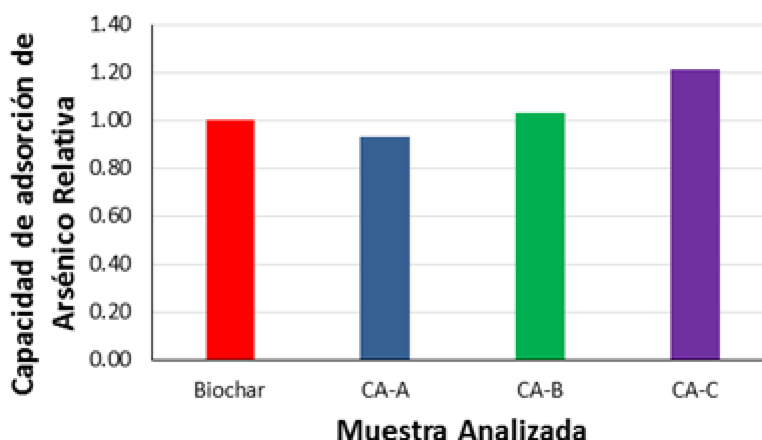


Figura 9. Capacidad de adsorción relativa de CO en Carbón Activado y Biochar.

4. DISCUSIONES

4.1 Caracterización de la materia prima

Tras someter los materiales estudiados al proceso pirolítico se puede mencionar que los barbijos quirúrgicos y los barbijos KN-95 permiten la obtención de residuos carbonosos (biochar) con un contenido moderado de cenizas. Los rendimientos de pirólisis obtenidos están alrededor del 10%. Por otro lado, cabe mencionar que el tratamiento térmico de guantes y trajes de bioseguridad favorecen la obtención de rendimientos mayores, con el inconveniente de generar gases nocivos, evidenciados durante y después del proceso pirolítico debido a la liberación de gases post-reactor. Además, el traje de bioseguridad genera una especie de plástico, con un aspecto duro y compacto lo cual no permite la obtención de biochar. Es por estos motivos que ambos materiales no son recomendables para su tratamiento como materia prima del biochar a través del proceso pirolítico.

El comportamiento de descomposición térmica de los residuos de poda municipal es similar al observado para los barbijos, mostrando una pérdida de masa de manera abrupta alrededor de los 340°C. Por otro lado, se obtuvo biochar con rendimientos de alrededor del 32%. Estos resultados sugieren que los residuos de poda son un excelente candidato a tratar de manera conjunta con los barbijos para mejorar el rendimiento global.

Debido a estos resultados alentadores, se realizaron pruebas con una mezcla de residuos de poda y barbijos en una relación 1:1 (50% en masa de cada uno). Los resultados de esta prueba muestran cambios en la masa alrededor de 240°C, además que la curva de descomposición posee una pendiente menor, es decir que el proceso de pirólisis es más controlado debido a un efecto sinérgico de la mezcla. El rendimiento final obtenido de residuos carbonosos fue de alrededor del 19%, permitiendo confirmar que la mezcla de residuos de poda y barbijos son una excelente opción para optimizar el proceso y los rendimientos en general.

4.2 Proceso pirolítico

El proceso pirolítico ha sido escalado exitosamente hasta producir 20 gramos de Biochar por lote, este rendimiento se ha mantenido constante durante la última etapa de escalamiento, en este sentido se logró encontrar el parámetro adecuado para escalar el proceso el cual es el tiempo de residencia, asumiendo que el reactor se comporta como un reactor CSTR, este parámetro de diseño nos permite escalar exitosamente el proceso y aumentar la cantidad de masa tratada por lote. Actualmente se ha logrado incrementar la capacidad del proceso en 143 veces la capacidad inicial del proceso.

4.2.1 Efecto de las condiciones de operación

Respecto a las condiciones de operación evaluadas se pueden mencionar las siguientes consideraciones importantes:

- El aumento de la temperatura de pirólisis afecta negativamente en el rendimiento del biochar, hasta los 427°C, temperatura sobre la cual no se evidencian cambios significativos en el rendimiento Lo cual tiene concordancia con lo revisado en bibliografía (Demirbas A., 2007).
- Sin embargo, la temperatura si posee un efecto más significativo respecto al área superficial, en este caso el área superficial incrementó de 4.1 m^2/g a 427°C hasta 16.8 m^2/g a 467°C.
- La rampa de calentamiento aplicada influye directamente en la cantidad de materia volátil que es eliminada durante el proceso de pirólisis. Sin embargo, no debería afectar significativamente en otras propiedades o parámetros de control como ser el área superficial (Kuo Z., 2015). En este sentido los resultados presentados están basados en rendimiento. Parámetro que tampoco fue afectado significativamente. Es por este motivo que se decidió mantener la rampa de calentamiento de 10 °C/min para las pruebas futuras.

4.3 Obtención de carbón activado

El proceso de obtención de carbón activado se ha realizado sin pérdidas de masa importantes y maximizando el área superficial cuyo mejor producto logró llegar hasta 303 m^2/g, con un rendimiento del 82%, este producto es prometedor para diversas aplicaciones y es un punto de partida para optimizar el proceso de obtención de carbón activado a partir de biochar, los efectos que tienen la temperatura y el tiempo se vieron estudiados a partir de este último producto y se observó que la aplicación de mayor temperatura (800 y 900 °C) desfavorecen el área superficial y la aplicación de mayor tiempo de exposición a la temperatura no tiene un efecto significativo pasadas las 2 horas de proceso.

4.4 Caracterización del carbón activado

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que el efecto de la temperatura y el tiempo de pirólisis sigue una tendencia similar a la descrita en bibliografía (Moussavi G., 2013). Los rendimientos de Carbón Activado obtenidos para todas las pruebas experimentales se hallan entre un rango de 75% y 90%, siendo valores elevados.

Respecto a la variación del rendimiento en función al tiempo se puede mencionar que el efecto es leve, generando un cambio de -0.16%. Y respecto a la variación del rendimiento en función de la temperatura se puede mencionar que posee un efecto más significativo en comparación, pero que aún es leve. Generando un cambio de -8.96%.

En relación al tiempo de pirólisis sobre el área superficial específica de carbón activado: se observa que el aumento del tiempo de pirólisis de una a dos horas, ocasiona un aumento de 84.95 m^2/g en el área superficial del Carbón Activado.

Por otro lado, se puede observar que el aumento de la temperatura de pirólisis de 500°C a 700°C provoca el aumento del área superficial específica de Carbón Activado en 165.01 m^2/g. Los resultados obtenidos permiten corroborar la hipótesis inicial planteada, es decir, que a bajas concentraciones de cloruro de amonio se puede mejorar el área superficial específica del carbón activado.

4.5 Aplicaciones

4.5.1 Aplicación de biochar en plantines municipales

Se puede apreciar, gracias a los resultados obtenidos del diseño experimental explicado en la Tabla 2, que no existen diferencias estadísticamente apreciables en relación a las distintas dosis de aplicación de biochar en el periodo evaluado, esto debido a que el “P-value” es menor al nivel de significancia.

En cuanto a la retención de humedad se puede observar un mejor comportamiento en la muestra BC10. La muestra BC50 presenta un comportamiento mejor que la muestra BC5, por lo que se puede deducir que existe un límite en el cual la adición extra de biochar desfavorece la retención de agua, tal y como se expresa en la bibliografía (Oliveira M. et al., 2018).

Con lo que respecta al índice de biomasa, se puede apreciar que las muestras BC5, BC10 y BC50 se encuentran dentro del rango considerado como deseable de acuerdo a (Bernier P. et al., 1995), esto indica que se logró un desarrollo adecuado de las raíces suficiente para proveer de agua y nutrientes a la parte aérea.

4.5.2. Aplicación de carbón activado como adsorbente de CO

La activación química del biochar con cloruro de amonio permitió el mejoramiento de las áreas superficiales específicas. Estas mejoras junto con la capacidad de intercambio catiónico relativa determinada para el biochar sin activar (4 cmol/kg - 5 cmol/kg) permiten que este material sea adecuado para la adsorción de contaminantes como ser el monóxido de carbono. Los resultados muestran un mejoramiento de hasta 3 veces en la capacidad de adsorción de CO, lo cual permite corroborar que bajas concentraciones de cloruro de amonio, son adecuadas para el mejoramiento y la activación apropiada del biochar obtenido a partir de residuos de poda municipales y barbijos.

4.5.3. Aplicación de carbón activado para la remoción de arsénico en aguas

La activación química del biochar con cloruro de amonio permitió mejorar la capacidad de adsorción de Arsénico (V) en alrededor de un 20%, esto si bien implica una mejora no se puede considerar demasiado significativa, en ese sentido los materiales de Carbón Activado son superiores en cuanto a área superficial pero la adsorción de Arsénico (V) está más relacionada a la cantidad de grupos funcionales presentes en el material que a la superficie de contacto del material, podemos inferir que el proceso si fue exitoso pero en una moderada magnitud.

5. CONCLUSIONES

- Se aplicó el proceso pirolítico para la conversión de residuos de bioseguridad (barbijos, guantes y trajes personales) y para la conversión de residuos de poda de jardinería (trozos de maderas) del municipio de La Paz.
- Se logró escalar el proceso desde una escala micro (700 mg de materia prima) hasta escala bench (100 g de materia prima) En todos los casos se obtuvo el material carbonoso conocido como Biochar y como subproductos bio-aceites y biogás-gas. Esto se logró mediante la optimización de las condiciones de operación (temperatura, tiempo de pirólisis y rampa de temperatura).
- Dadas las similitudes en el comportamiento de descomposición térmica de los residuos de bioseguridad y los residuos de poda municipal el procedió a realizar el proceso pirolítico con una mezcla de ambos. Esto permitió mejorar el rendimiento global de biochar hasta 25%.
- El Biochar obtenido tiene un área superficial relativa igual a 16.5 m^2/g.
- La composición elemental final del Biochar muestra valores altos de nitrógeno (1.9%), fósforo (2096 mg/kg) y potasio (38539 mg/kg). Estas propiedades son atractivas para la aplicación de biochar como un sustrato de la tierra para la jardinería y/o agricultura en general.
- Se aplicó biochar como sustrato en la siembra de plantines de bajo porte (Ajuga Rosada y Lechuguin) y plantines florales (Gazania). Se evaluó el efecto del biochar en parámetros de crecimiento y también en las propiedades del suelo.
- De acuerdo al índice de masa, los plantines con biochar son de calidad media muy próximo a la calidad Alta. Asimismo, la adición de Biochar incrementa significativamente la retención de humedad del suelo.
- Se encontró que ambos parámetros (índice de masa y retención de humedad) son favorecidos cuando el biochar representa el 10% del sustrato total.
- La tasa de crecimiento y diámetro de tallo no fueron afectados significativamente por la adición de Biochar, posiblemente debido al tiempo corto desde la siembra.
- Actualmente, se ha aplicado el Biochar en otros tipos de plantines florales (Primola, Clavelin Español, Botón Soltero y Penstemon) y se aplicará en especies arbustivas y forestales, para evaluar su efecto a largo plazo.
- Además, se obtuvo carbón activado a través de la activación química del biochar con cloruro de amonio al 2% y tratamientos térmicos entre 500°C y 700°C. Este procedimiento permitió la obtención de rendimientos elevados (>78%) y áreas superficiales específicas elevadas (>212 m^2/g).
- Finalmente, se aplicó el carbón activado en la adsorción de contaminantes en medios líquidos y gaseosos. Así, la adsorción de Arsénico con biochar y carbón activado en medio acuoso muestra buenas capacidades de adsorción.
- La capacidad de adsorción de monóxido de carbono gaseoso con carbón activado se ha incrementado de dos a tres veces en relación a la adsorción en biochar sin activar.

- Estos resultados indican que el Carbón Activado obtenido a partir de iochar tiene potencial aplicación como adsorbente y amerita estudios complementarios para su aplicación final en sectores como el Industrial y/o el sector ambiental.

6. BIBLIOGRAFÍA

Bernier, P., Lamhamedi, M. and Simpson, D. (1995) 'Shoot:root ratio is of limited use in evaluating the quality of container conifer stock', *Tree Planters' Notes*, 46(3), pp. 102–106. Available at: https://rngr.net/publications/tpn/46-3/shoot-root-ratio-is-of-limited-use-in-evaluating-the-quality-of-container-conifer-stock/.

Demirbas, A. (2007) 'Effect of temperature on pyrolysis products from biomass', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 29(4), pp. 329–336. doi: 10.1080/009083190965794.

Jung, S. *et al.* (2021) 'Valorization of disposable COVID-19 mask through the thermo-chemical process', *Chemical Engineering Journal*, 405(July 2020), p. 126658. doi: 10.1016/j.cej.2020.126658.

Kloss, S. *et al.* (2012) 'Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties', *Journal of Environmental Quality*, 41(4), pp. 990–1000. doi: 10.2134/jeq2011.0070.

Moussavi, G. *et al.* (2013) 'Preparation, characterization and adsorption potential of the NH4Cl-induced activated carbon for the removal of amoxicillin antibiotic from water', *Chemical Engineering Journal*, 217, pp. 119–128. doi: 10.1016/j.cej.2012.11.069.

Oliveira, M. N. De *et al.* (2018) 'Biochar Dosage and Granulometry Influencing Soil Density and Water Retention', *International Journal of Agriculture Sciences(IJAS)*, 10(4), p. 5153. doi: 10.9735/0975-3710.10.4.5153-5157.

Pandey, S. D. *et al.* (2021) 'Structural and elemental analysis of biochars in the search of a synthetic path to mimetize anthropic Amazon soils', *Journal of Environmental Management*, 279(November 2020). doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111685.

Raboin, L. M. et al. (2016) 'Improving the fertility of tropical acid soils: Liming versus biochar application? A long term comparison in the highlands of Madagascar', Field Crops Research. Elsevier B.V., 199(April 2013), pp. 99–108. doi: 10.1016/j.fcr.2016.09.005.

Reyes, J. T. S. *et al.* (2010) *MICHOACÁN*.

Sáenz, J.T., Villaseñor, F.J., Muñoz, H. J., Rueda, A., Prieto, J.A. (2010) *Calidad de Planta en Viveros Forestales de Clima Templado en Michoacán*. Primera Edición, México. Folleto Técnico Núm. 17.

Stauffer, E., Dolan, J., Newman, R., (2008) *Fire Debris Analysis*, Estados Unidos, Academic Press

Staley, B. F., de Los Reyes, F. L. and Barlaz, M. A. (2012) 'Comparison of Bacteria and Archaea communities in municipal solid waste, individual refuse components, and leachate', *FEMS Microbiology Ecology*, 79(2), pp. 465–473. doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01239.x.

Walters, R. et al. (2015) 'Investigationg Bio-Char as Flow Modifier and Water Treatment Agent for Sustainable Pavement Design', American Journal of Engineering and Applied Sciences, 8(1), pp. 138–146. doi: DOI: 10.3844/ajeassp.2015.138.146.

Wang, Jiao *et al.* (2020) 'Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: Suggestions for disinfection strategy during coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic in China', *Environmental Pollution*, 262, p. 114665. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114665.

Wijitkosum, S. and Jiwnok, P. (2019) 'Elemental composition of biochar obtained from agriculturalwaste for soil amendment and carbon sequestration', Applied Sciences (Switzerland), 9(19). doi: 10.3390/app9193980.

Zeng, K. *et al.* (2015) 'The effect of temperature and heating rate on char properties obtained from solar pyrolysis of beech wood', *Bioresource Technology*, 182, pp. 114–119. doi: 10.1016/j.biortech.2015.01.112.